

142432, г. Черноголовка, Московская область,
просп. Академика Семенова, д. 1-А,
диссертационный совет Д.002.207.01
на базе Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау
Российской академии наук.

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОПОНЕТА

Горного Игоря Викторовича

на диссертацию **АНТОНЕНКО Даниила Сергеевича**

«ЭФФЕКТЫ ТОПОЛОГИИ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В
НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ СВЕРХПРОВОДНИКАХ»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

(специальность 01.04.02 – «Теоретическая физика»)

Изучение явлений, связанных с электрон-электронным взаимодействием и нетривиальной топологией в неупорядоченных системах со сверхпроводящими корреляциями, в настоящее время одно из наиболее актуальных направлений физики конденсированного состояния. Актуальность этих исследований обусловлена, в частности, возникновением и бурным развитием новой области экспериментальной и теоретической физики – физики топологических изоляторов и сверхпроводников. Стоит также отметить возрождение интереса к концептуально важной проблеме влияния беспорядка и электрон-электронного взаимодействия на формирование сверхпроводящего состояния, в первую очередь – в контексте перехода сверхпроводник-изолятор в сверхпроводящих пленках. Поставленные в диссертационной работе Д.С. Антоненко цели и задачи, развитые в ней теоретические подходы к анализу этого круга вопросов, а также базирующиеся на этом анализе предсказания для наблюдаемых и интерпретация экспериментальных данных, важны как для недавних, так и для будущих экспериментов. Таким образом, **актуальность темы работы не подлежит сомнению.**

В диссертации Д.С. Антоненко детально изучены эффекты электрон-электронного взаимодействия на баллистических масштабах в неупорядоченных трехмерных системах. В отличие от низкоразмерных систем, роль таких «баллистических» эффектов в трехмерной геометрии не была ранее оценена должным образом. В работе также исследуются статистические свойства неупорядоченных сверхпроводящих проволок, в которых возможно

образование майорановских состояний. Статистика флуктуаций кондактанса и фактор Фано в таких системах не изучались ранее для произвольной длины провода. По всем этим направлениям автором диссертации представлены к защите **оригинальные результаты**, имеющие как фундаментальное, так и методологическое значение.

Диссертационная работа состоит из введения, трех основных глав, заключения, списка литературы и семи приложений. Введение носит обзорный характер и описывает ключевые для диссертации концепции, а также современное состояние научного знания в таких областях физики твердого тела как мезоскопика, физика сверхпроводящих неупорядоченных материалов и топология квантовых систем. Во введении также сформулированы цели и задачи диссертационной работы, обоснованы актуальность, новизна и научная значимость исследования, представлены выносимые на защиту положения, а также описана структура диссертации. Стоит отметить педагогичность и прозрачность изложения материала, который может послужить хорошей основой учебного курса для старшекурсников, интересующихся современными проблемами физики конденсированного состояния. Необходимо также подчеркнуть, что каждая из глав, представляющих основные результаты работы, также начинается с краткого введения, описывающего физику изучаемых явлений и соответствующий математический аппарат в доступных терминах. Представленные здесь сведения имеют первостепенное значение для последующего изложения и могут рассматриваться в качестве справочного пособия для исследователей, работающих в области электронного транспорта и сверхпроводимости в мезоскопических системах.

Основные результаты представленной на защиту диссертации изложены в трех главах, которые базируются на опубликованных автором диссертации работах.

Первая глава диссертации посвящена детальному исследованию баллистического вклада в поправку к туннельной плотности состояний, вызванную совместным эффектом беспорядка и взаимодействия (как прямого, так и обменного) в трехмерных системах. При этом доказана универсальность скачка производной этого вклада по энергии на уровне Ферми для взаимодействия конечного радиуса; в частности, продемонстрировано, что отклонение от параболичности электронного спектра не сглаживает этот излом в плотности состояний.

Во второй главе изучены поправки к критической температуре перехода неупорядоченной системы в сверхпроводящее состояние, связанные с совместным эффектом беспорядка и взаимодействия на баллистических масштабах в квазидвумерных структурах. Показано, что обусловленный рассеянием на трехмерных фриделевских осцилляциях, окружающих примеси, баллистический вклад в сдвиг критической температуры может

оказаться важнее известного ранее вклада, связанного с двумерным диффузионным движением на больших пространственных масштабах. Наличие такого баллистического вклада может существенно поменять интерпретацию зависимости критической температуры от параметра, определяющего силу беспорядка, в ряде экспериментов, в которых сверхпроводимость наблюдалась в достаточно толстых пленках.

В рамках теоретико-полевого подхода, основанного на нелинейной сигма-модели, **в третьей главе** были изучены транспортные характеристики диффузионных многоканальных майорановских проволок. Впервые было получено в замкнутом виде решение одномерной сигма-модели высшего ранга. Научная значимость полученных в данной главе результатов несомненна ввиду отсутствия до настоящего момента исчерпывающей теоретической картины неупорядоченных топологических сверхпроводников. Отдельно стоит отметить высочайший технический уровень владения математическим аппаратом, проявленный здесь автором диссертации. На мой взгляд, в своем поколении он входит в ведущую пятерку молодых ученых во всем мире, применяющих формализм нелинейной сигма-модели для изучения неупорядоченных систем. Важнейшим достижением изложенной в главе работы является глубокое осознание общей иерархической структуры собственных функций на многообразиях суперсимметричных сигма-моделей старшего ранга, что должно способствовать построению более общей теории локализации в топологических системах.

Полученные в диссертации Д.С. Антоненко результаты вносят существенный вклад в развитие теоретической физики твердого тела. Практическая ценность исследований, представленных в диссертации, значима ввиду перспективы использования сверхпроводящих материалов и структур – в особенности топологических – в квантовых вычислениях. Результаты и основные научные положения диссертации могут быть рекомендованы к использованию в организациях, проводящих теоретические и экспериментальные исследования в области физики конденсированного состояния, а также ведущих разработку приборов на основе сверхпроводящих пленок и устройств для квантовых информационных технологий. Исходя из вышесказанного, можно с уверенностью констатировать, что **научная и практическая значимость** результатов, представленных к защите, **несомненна**.

Все основные результаты диссертационной работы Д.С. Антоненко получены в работах автора впервые. Этим определяется **научная новизна** работы. Все выносимые на защиту **научные положения и выводы** тщательно **обоснованы** с применением максимально адекватных математических методов. Результаты опубликованы в авторитетных научных изданиях, рекомендованных ВАК, а также доложены на российских и

международных конференциях и семинарах. Таким образом, в **достоверности** полученных результатов не возникает сомнений.

По диссертации имеется ряд замечаний и вопросов, не имеющих принципиального характера:

- Замечание общего характера к решениям задач в первой и второй главе касается использования в них исключительно модели короткодействующего беспорядка. Известно, что в отличие от диффузионных процессов (например, определяющих известный ранее сдвиг критической температуры в сверхпроводящих пленках), процессы рассеяния на баллистических масштабах весьма чувствительны к характеру беспорядка. Как изменятся полученные в этих главах ответы в системах с заряженными примесями или с плавным беспорядком?
- В первой главе, посвященной анализу баллистической поправки к плотности состояний в трехмерной системе, используется модельный потенциал Юкавы с коэффициентом λ , определяющим силу взаимодействия. При этом для реального статически экранированного кулоновского потенциала сила взаимодействия (связанная с диэлектрической проницаемостью материала) определяет также и радиус экранирования. Можно ли на основании решения модельной задачи сделать какие-то определенные выводы о соотношении характерных масштабов в реалистичном случае кулоновского взаимодействия? Возможно ли простое обобщение полученных результатов на случай взаимодействия, описываемого в рамках теории Ферми-жидкости с помощью набора феноменологических констант в синглетном, триплетном и куперовском каналах?
- При рассмотрении сдвига критической температуры во второй главе диссертации было бы интересно проанализировать роль баллистического «одевания» примесями также и вершин электрон-фононного взаимодействия, включив его в определение волнистой линии в диаграммах на Рис. 2.3.
- При изучении статистических свойств майорановских проволок конечной длины усреднение различных транспортных величин производится по всем конфигурациям беспорядка – как тем, что соответствуют топологически тривиальной фазе, так и тем, в которых имеются майорановские состояния. Возможно ли статистическое описание только топологически нетривиальных образцов?
- В части «0.3 Топологические явления в физике твердого тела и беспорядок» было бы уместно изменить фразу «Первым открытым топологическим изолятором был

квантовый эффект Холла». В самом деле, топологическим изолятором является материал или структура, а не физический эффект.

Приведенные выше замечания не влияют на общую высокую оценку диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа Д.С. Антоненко выполнена на высоком научном уровне и содержит принципиально новые, фундаментально и практически важные результаты. Диссертация написана ясно, хорошим языком. В работе чётко сформулированы цели исследования, детально описаны использованные теоретические методы, подробно проанализированы полученные результаты. Выносимые на защиту научные положения и основные выводы диссертации хорошо обоснованы. Автор диссертации проявил чрезвычайно высокий технический уровень владения современными методами теоретической физики. Помимо технической стороны, он продемонстрировал глубокое понимание физических явлений и механизмов, имеющих отношение к темам его исследований.

Представленная диссертация удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Совокупность полученных результатов представляет собой серьезное научное достижение в области физики неупорядоченных систем и демонстрирует способность автора осуществлять самостоятельные научные исследования и научно-педагогическую деятельность. Нет никаких сомнений в том, что **Даниил Сергеевич Антоненко** заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика».

4 декабря 2020 г.

Горный Игорь Викторович,

доктор физико-математических наук, профессор РАН,

старший научный сотрудник

ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Подпись д.ф.-м.н. И.В. Горного заверяю

Подпись  
 зав. отделом кадров
 08.12.2020